

MĚŘENÍ TENZORU NAPJATOSTI HORNINOVÉHO MASIVU POMOCÍ KUŽELOVÉ SONDY
STRESS MEASUREMENT IN ROCK MASSIF USING CONICAL PROBE

Abstract

We have been engaged in the stress measurement in rock massif by the hydrofracturing method. This method enables measurement of stress in plane normal to the axis of bore, when one of the principal stresses parallel to the axis is assumed. But, in complex geomechanical conditions connected with the geology and mining action, the parallelism of the principal stress to the axis of borehole cannot be assumed with certainty. That is why we decided to develop a device making the determination of the total state of stress tensor possible. In design we started from experiences of K.Sugawara and Y.Obara that have been using the compact conical borehole overcoring system CCBO. Conical shape of the strain gauge probe CCBO makes the fixation of the probe in borehole easy and makes the measurement of stress in independent directions possible. The principle of the measuring method, preparation of borehole, design of the probe for continual measurement of stress in course of overcoring and first results of laboratory and in-situ testing of the development sample are described. Simplified conical probe was designed for long term monitoring of the stress changes in rock massif.

Úvod

Napětíová pole jsou jedním ze základních faktorů, které spolu s mechanickými a přetvárnými vlastnostmi hornin, rozhodným způsobem ovlivňují chování horského masivu. Proto má zjišťování, popř. monitorování, změn napětíových polí v horském masivu zásadní význam pro geotechniku (zvláště hornictví), podzemní stavitelství a další obory zabývající se napětíovými stavy a projevy napětí v zemské kůře. Poznání napětíových polí je přínosem pro projektování a zdárnou realizaci geotechnických podzemních projektů (např. pro posuzování stability podzemních prostor, chování navržených výztuží podzemních objektů, pro časoprostorové situování podzemních objektů) zvláště v netriviálních geomechanických podmínkách a to jak z hlediska přírodních faktorů ovlivňujících napětíová pole (např. strukturní a geologická stavba horninového masivu, tektonická napětí, trhliny a diskontinuity v horninovém masivu), tak rovněž z hlediska antropogenních faktorů (geomechanická konfigurace podzemních prostor a dynamika jejich změn). Při dobývání ložisek nerostných surovin dochází k přerozdělování napětíových polí (ke změnám směrů a velikostí působících hlavních napětí), proto v exponovaných predisponovaných oblastech může dojít k enormní koncentraci zatížení hornin a ke vzniku anomálních dynamických jevů, někdy ve formě devastujících horských ořesů. Data získaná z výzkumu velikosti, směrů a změn napětí v horském masivu jsou zásadním přínosem pro oblast matematického modelování, kde mohou být použita jako vstupní parametry modelu napětíových polí za účelem získání přesnějšího obrazu o chování horského masivu a podzemních objektů v předmětných oblastech.

V geotechnické praxi v našich (ČR) podmínkách bývají dosud většinou využívány jen výpočty napětíového pole vycházející z teoretického chování hornin a předpokládaného svislého geostatického tlaku v dané hloubce. Vývoj případných postupujících deformací napětíového pole je pak odvozován od antropogenních zásahů do relativně homogenního masivu. Ve skutečnosti je však napětí v masivu ovlivňováno i blízkými geologickými strukturami. Naše vlastní zkušenosti prokazují, že výsledky napětíových měření byly přínosem už pro projektování vedení důlních děl. Deformační projevy v

¹ RNDr., CSc., Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, Ostrava, stas@ugn.cas.cz

² Ing., CSc., Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, Ostrava, knejzlik@ugn.cas.cz

³ Ing., Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, Ostrava, rambousk@ugn.cas.cz

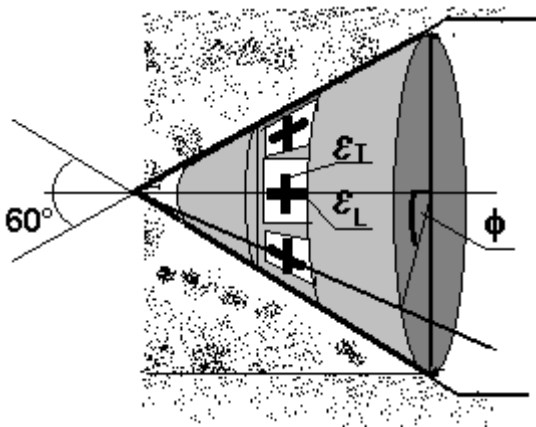
chodbách byly ve zřejmém vztahu nejen k velikosti, ale i k vzájemné orientaci směru maximálních horizontálních napětí a směru vedení díla.

Na Ústavu geoniky AV ČR se již řadu let zabýváme problematikou zjišťování napětového stavu masivu in-situ, zejména v oblasti české části hornoslezské pánve. V převážné míře využíváme měřicí zařízení na bázi hydraulického štěpení stěn vrtu. Toto zařízení má mnoho výhod i omezení. Měření napětí metodou hydraulického štěpení mlčky předpokládá splnění některých netriviálních předpokladů. Jedním z nich je předpoklad, že jedno z hlavních napětí je rovnoběžné s osou vrtu. Ostatní dvě hlavní napětí jsou pak orientována v rovině kolmé k ose vrtu. To v exponovaných místech nemusí být vždy splněno. Jedním ze zásadních omezení je i skutečnost, že jím nelze změřit úplný tenzor napětí v daném místě. Proto jsme se rozhodli vyvinout jiné zařízení, které by v případě potřeby toto umožňovalo. Rozhodli jsme se oživit myšlenku měření napětí pomocí metody odlehčeného jádra typu „doorstoper“, avšak v nové kuželové geometrii, která na rozdíl od dřívější klasické metody umožňuje v stanovit najednou kompletní tenzor napětí. Kuželový tvar měřené plochy je kompromisem mezi jinými geometriemi. Je výhodný z hlediska poměrně jednoduché instalace, má samostředící účinek vyžaduje poměrně krátký kompaktní úsek k obvrtní pro úplné odlehčení. Nevýhodou metody je, že vyhodnocení měření je možné pouze numerickými metodami, což je však v dnešních dobách snadno řešitelné.

Princip měření metodou CCBO

Nově vyvíjené zařízení vychází ze známého principu měření napětí na bázi vyhodnocení deformačních změn odlehčeného vrtného jádra metodou „overcoring“. Využíváme modifikace metody CCBO, navržené a odzkoušené v Japonsku profesory Sugawarou a Obarou (Nakamura et al., 1999).

Dno vrtu je upraveno do tvaru kužele, do něhož je vlepena kuželová hlava se sadou tenzometrů na plášti. Tvar kužele zajišťuje rozdílnou orientaci jednotlivých měřicích tenzometrů v prostoru, což při jejich dostatečném počtu umožňuje po obvrtání jádra rekonstruovat celý tenzor napětí. Schematické znázornění rozmístění tenzometrů na měřicí hlavici je představeno na obr. 1.



Obr.1 Schématické rozmístění tenzometrů na povrchu kuželové hlavice

V našem případě používáme šest dvojic na sebe kolmých tenzometrů rovnoměrně rozložených po obvodu kužele. Pro výpočet původního okolního napětí si označme indexem L tenzometry měřící deformaci povrchu kužele ve směru jeho spádnice z vrcholu k podstavě a indexem T tenzometry měřící tangenciální deformaci na povrchu pláště kužele. Jak uvádí (Kang 2000), transformace napětíového tenzoru na deformace na kuželu je dána vztahem:

$$\left| \begin{array}{c} \xi_{Ti} \\ \vdots \\ \xi_{Li} \\ \vdots \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} A_{11} + A_{12} \cos 2\Phi_i, A_{11} - A_{12} \cos 2\Phi_i, C_{11}, D_{11} \sin \Phi_i, D_{11} \cos \Phi_i, 2A_{12} \sin 2\Phi_i \\ \vdots \\ A_{21} + A_{22} \cos 2\Phi_i, A_{21} - A_{22} \cos 2\Phi_i, C_{21}, D_{21} \sin \Phi_i, D_{21} \cos \Phi_i, 2A_{22} \sin 2\Phi_i \\ \vdots \end{array} \right| \cdot \{\sigma\}/E$$

(1)

kde: $\{\sigma\}$ je napěťový tenzor ve formátu $\{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}\}^T$,
 E – Youngův modul pružnosti,
 $\epsilon_{Ti}, \epsilon_{Li}$ – deformace na povrchu pláště kuželu v místě i-tého tenzometru,
 Φ_i – úhel pootočení příslušného tenzometru k vybranému směru x.
 $A_{nm} \cdot D_{kl}$ – koeficienty deformace.

Hodnoty koeficientů deformace jsou závislé na geometrii sondy a Poissonovu číslu. Nejsou vyjádřeny analyticky, ale jsou určovány numericky. Výpočet tenzoru napětí se provádí optimalizací jeho tvaru metodou nejmenších čtverců rozdílů naměřených a vypočtených deformací v jednotlivých bodech měření. Původní tenzor napětí můžeme vyjádřit maticovou rovnicí:

$$[A] \{ \sigma \} = \{ \epsilon \} \quad (2)$$

kde $[A]$ je matice rozměru $n \times 6$. Elementy jsou vypočteny dosazením odpovídajících koeficientů a úhlů pootočení Φ_i pro jednotlivé tenzometrické prvky v příslušných vztazích pro ϵ_T a ϵ_L (1).

Po normalizaci a úpravě vztahu dostáváme rovnici vyjadřující nejpravděpodobnější tvar původního napěťového tenzoru:

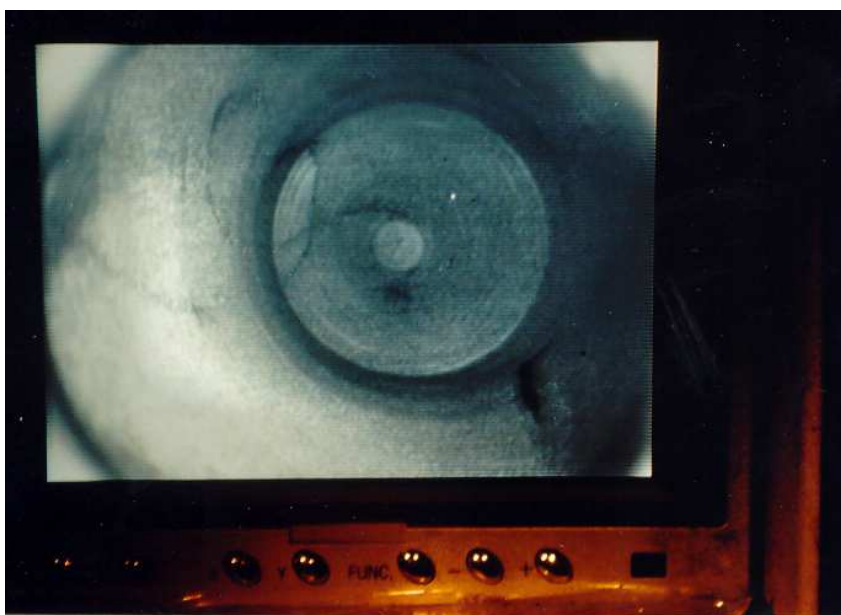
$$\{\sigma\} = E [[A]^T [A]]^{-1} [A]^T \{\epsilon\} \quad (3)$$

Příprava vrtu pro měření napětí in-situ metodou CCBO

Po výběru lokality a odvrtání vrtu do patřičné délky je odebráno vrtné jádro pro stanovení Poissonova čísla. Poté je vrt vypláchnut a následuje kontrola jeho kvality u dna pomocí TV kamery. Je-li kvalita vyhovující, proběhne tvarování dna vrtu speciálními kuželovými korunkami (Obr. 2). Tyto korunky (hrubá a jemná) byly vyvinuty ve spolupráci s UR DIAMANT Šumperk. Pro správné měření je nezbytné, aby kuželová plocha byla hladká a bez poškození (trhlin). Proto se kvalita kuželového dna opět kontroluje TV kamerou (Obr. 3). Před nalepením tenzometrické sondy je plocha vypláchnuta lihem a vysušena vzduchem. Podávací tyče pro nalepení hlavice jsou opatřeny orientačním zařízením fy Pajari. Tím je zabezpečena informace o orientaci hlavice v prostoru. Po zатуhnutí lepidla je možno zahájit obvrtávání tenzometrické sondy.



Obr.2 Kuželové vrtné korunky

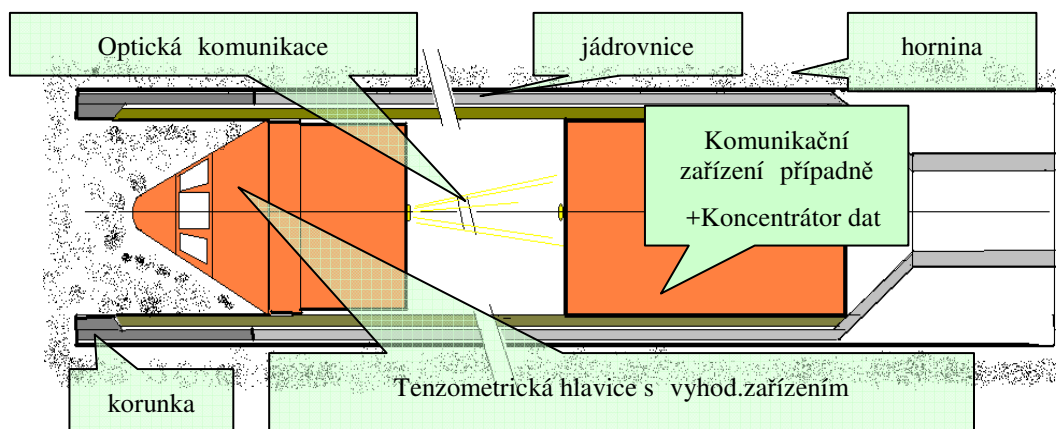


Obr.3 Kontrola kvality kuželového čela vrtu TV kamerou

Popis konstrukce nové aparatury s kuželovou sondou

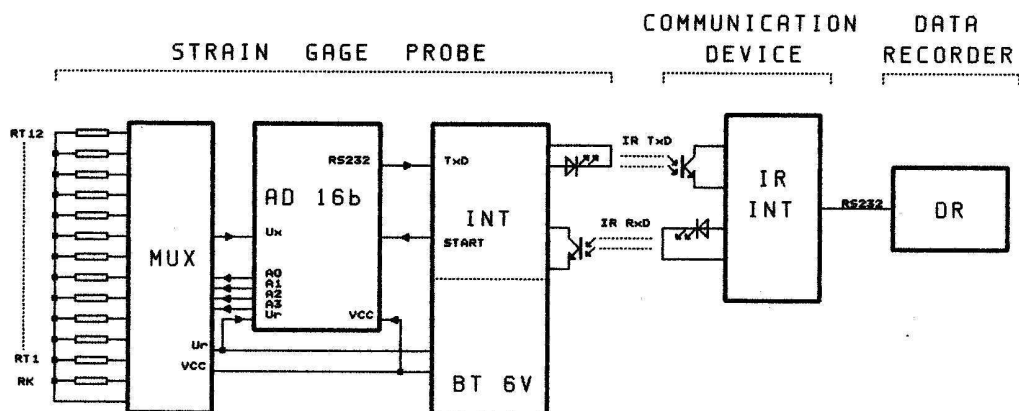
Aparatura je konstruována pro vrtu o průměru 76mm. Aby byl dokladován korektní průběh experimentu a tím platnost naměřených dat, je nutno zajistit kontinuální záznam deformací v průběhu obvrtávání jádra, tj. přenos dat z měřicí sondy přes rotující vrtný nástroj do záznamového zařízení a to v prostředí vodního výplachu. Po rozboru technických a kapacitních možností řešení v podmínkách pracoviště základního výzkumu jsme došli k závěru, že nejsme schopni technicky vyřešit vedení kabelu v rotujícím vrtném nástroji a že jednodušší bude tenzometrickou sondu řešit jako autonomní zařízení, které bezdrátově vysílá měřená data do rotujícího snímáčího zařízení instalovaného ve vrtném nástroji – viz blokové schéma na Obr. 4.

V první fázi vývoje aparatury byla pozornost soustředěna hlavně na vývoj tenzometrické hlavičky a snímáčího zařízení bylo vyvíjeno jen jako komunikační interface mezi ní a počítačem. Komunikace je řešena opticky, neboť předpokládáme výplach čistou vodou.



Obr.4 Blokové schéma měřicího zařízení zařízení ve vrtu při obvrtávání

Nepohyblivá, do čela vrtu vlepená tenzometrická hlavice, snímá a vyhodnocuje deformaci v reálném čase obvtávání. Snímací zařízení, uchycené v zadní části jádrovnice, zajišťuje přenos naměřené informace z tenzometrické hlavice do komunikačního zařízení, případně koncentrátoru dat. Tenzometrická hlavice a snímací zařízení nejsou spolu nijak mechanicky spojeny. Přenos informace probíhá optickou cestou. Tímto způsobem byl také vyřešen problém zatěžování měřicí hlavice mechanickými rázy během vrtání od spojovacího kabelu procházejícího rotujícím vrtným soustředěním a jeho vahou. Blokové schéma elektronických obvodů aparatury je na Obr. 5.



Obr.5 Blokové schéma elektronických obvodů měřicí aparatury

Aparatura sestává z tenzometrické hlavice (Strain Gage Probe), komunikačního zařízení (Communication Device, IR INT) a záznamového počítače (Data Recorder, DR).

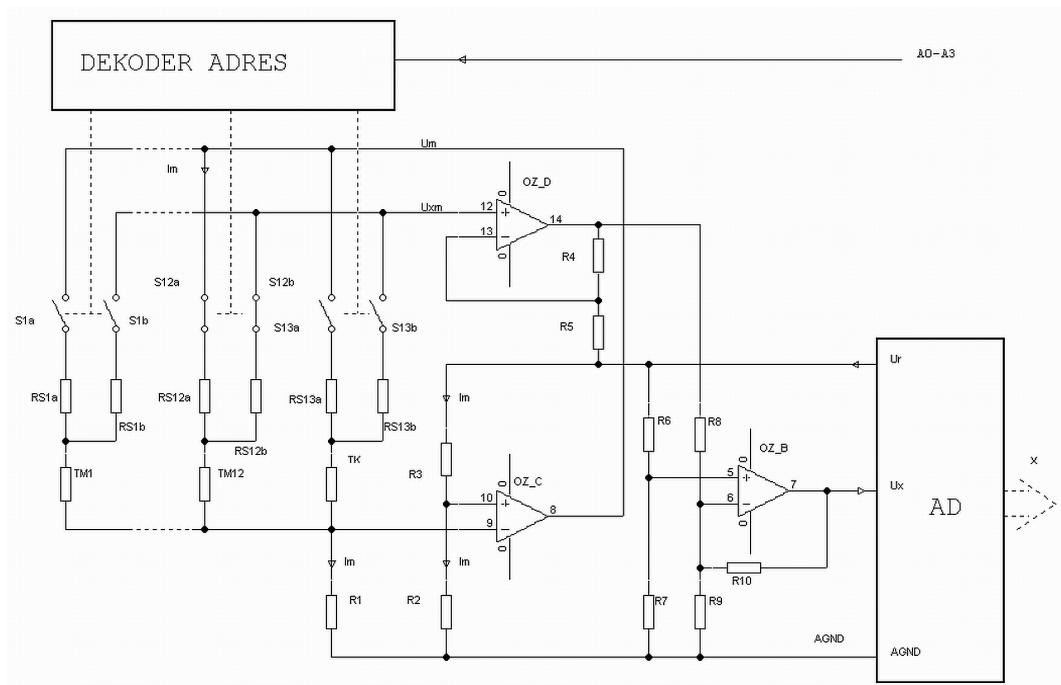
Tenzometrická hlavice je řešena jako multiplexovaný tenzometrický čtvrtmůstek MUX, na který je připojeno 12 měřicích tenzometrů RT1 – RT12 a kompenzační tenzometr RK. V bloku MUX se signály z tenzometrů také zesílují. Měřicí sekvence je zahájena impulsem START, který vyšle DR přes IR INT. Analogově-číslcový převodník AD 16b změří postupně signály na všech tenzometrech (přepíná MUX adresovými signály A0 – A3) a vyšle data ve formě sériového kódu IR Tx/D do IR INT a dále do DR, kde se tato zaznamenají.

Obvody sondy jsou napájeny baterií BT 6V. V klidu se sonda nachází ve stavu „standby“, kdy jsou napájeny jen obvody přijímače IR paprsku. Napájení obvodů celé sondy se zapne po přijetí impulsu START. Po nastavené době se opět automaticky vypne a zdroj se uvede opět do stavu „standby“.

Jako DR může být použit mikropočítačový koncentrátor dat, nebo počítač vybavený sériovým portem (notebook, mobilní terminál Psion Workabout). Mikropočítačový koncentrátor by byl umístěn přímo v rotující jádrovnici. Popisovaná vývojová verze aparatury je řešena pro záznam dat v PC. Není dosud řešen přenos dat mezi PC a snímacím zařízením v rotující části vrtačky. Zde předpokládáme použití komerčně dostupných počítačových komunikačních prvků, např. IR přenosů nebo radiomodemů.

Zapojení obvodů tenzometrického čtvrtmůstku

Klíčovým problémem při konstrukci kuželové sondy je dosažení dostatečné stability vyvážení a nízké úrovně šumu bezkontaktně multiplexovaného tenzometrického čtvrtmůstku napájeného stejnosměrným proudem. Odporů polovodičových spínačů v sepnutém stavu (cca 50Ω) jsou totiž srovnatelné s odpory použitých tenzometrů (350Ω). Proto bylo vyvinuto zapojení, které vliv odporů spínačů eliminuje – viz obr. 6.



Obr.6 Principiální zapojení obvodů multiplexovaného tenzometrického čtvrtmůstku

Na Obr. 6 jsou vyznačeny měřící tenzometry TM1 – TM12 a kompenzační tenzometr TK a polovodičové spínače ve formě ideálních spínačů S1a až S13b a jejich náhradních odporů v sepnutém stavu RS1a až RS13b. Spínání je adresováno binární adresou A0 – A3 přes dekodér adres, který zajišťuje sepnutí příslušného páru spínačů, např. S12a, S12b na obr. 6. Vlastní tenzometrický můstek tvoří rezistory R1, R2, R3 a příslušný tenzometr. Odpor napjatého tenzometru R_t je definován vztahem:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + k \cdot x), \quad (4)$$

kde R_0 je klidový odpor [Ω], k je konstanta citlivosti (k -Factor, Gage factor) a $x = \Delta l/l$ je měřená relativní deformace [μStrain]. Při vyvážení můstku platí pro hodnoty rezistorů podmínky (P1) $R_1 = R_2$ a (P2) $R_3 = R_0$. Ideální operační zesilovač OZ_C udržuje mezi svými vstupy vlivem negativní zpětné vazby nulové napětí a svým výstupem napájí tenzometr konstantním proudem I_m (linearizuje můstek).

$$I_m = U_r / (R_2 + R_3), \quad (5)$$

kde U_r je referenční napětí. Protože $R_1 = R_2$, protékají oběma větvemi můstku stejné proudy I_m . Užitečný signál U_{xm} vzniká úbytkem napětí na R_1 a tenzometru:

$$U_{xm} = \frac{R_1 + R_0 + R_0 \cdot k \cdot x}{R_2 + R_3} \cdot U_r = U_r + \frac{R_0}{R_2 + R_3} \cdot U_r \cdot k \cdot x. \quad (6)$$

Napětí U_{xm} se přivádí přes spínač S12 na neinvertující vstup diferenciálního zesilovače s OZ_D. Odpor RS12b se neuplatňuje, neboť vstupní odpor invertujícího vstupu se blíží k nekonečnu. V tomto stupni se signál z neinvertujícího vstupu zesílí $A_1 = (1 + R_4/R_5)$ krát, signál z invertujícího vstupu $1x$. Platí-li podmínka (P3) že $R_6 = R_7 = R_8 = R_9$, potom pro výstupní napětí U_x platí:

$$U_x = 0,5 \cdot U_r + 0,5 \cdot U_r \cdot \frac{R_0}{R_2 + R_3} \cdot \frac{R_{10}}{R_9} \cdot A_1 \cdot k \cdot x \quad (7)$$

Signálové napětí U_x je vedeno na vstup analogově-číslicového převodníku (AD), který však využívá stejné napětí U_r . V bipolárním režimu je výstupní numerická hodnota X dána vztahem:

$$X = 2^{14} \cdot \frac{U_x - 0,5 \cdot U_r}{U_r} \quad (8)$$

Po dosazení (7) do (8) získáme výslednou závislost X na měřené relativní deformaci x :

$$X = 2^{13} \cdot R_0 \cdot \frac{R_{10}}{R_9 \cdot (R_2 + R_3)} \cdot \frac{R_4 + R_5}{R_4} \cdot k \cdot x = C \cdot x, \quad (9)$$

kde C je výsledná konstanta citlivosti za předpokladu, že k je shodné pro všechny tenzometry. Ze vztahu (9) je zřejmé, že výsledný údaj vyváženého čtvrtmůstku X je nezávislý na referenčním napětí U_r , ale závisí na velikosti konstanty citlivosti tenzometrů k a na hodnotách všech rezistorů v zapojení (vztah platí za předpokladů splnění podmínek P1, P2 a P3 a za předpokladu, že všechny operační zesilovače jsou ideální, tj. s bez vstupní napěťové a proudové nesymetrie).

Filtrace šumu, numerická korekce nevyvážení a kalibrace citlivosti

V praxi nelze podmínky ideálního vyvážení (P1, P2 a P3) splnit z důvodu omezené přesnosti a stability použitých rezistorů. Tenzometry vykazují teplotní závislost cca $5 \mu\text{Strain/K}$. Také operační zesilovače nejsou ideální a vykazují vstupní napěťovou a proudovou nesymetrii. Výše uvedené vlivy se projeví jako systematické nevyvážení můstku $\Delta X_0(m)$, stejné pro všechny tenzometry (předpokládáme stejnou teplotu všech tenzometrů). Kromě statického nevyvážení můstku se k měřeným hodnotám přičítá také zesílený šum operačních zesilovačů, reprezentovaný hodnotou x_n .

Vlivem výrobních tolerancí tenzometrů a nestejných parazitních mechanických napětí, která vzniknou při zalévání a zalepení sondy, vznikne na jednotlivých měřicích tenzometrech individuální chyba $\Delta X_i(\text{adr})$. Celkové nevyvážení pro daný tenzometr $\Delta X(\text{adr})$ je dáno součtem systematického nevyvážení můstku a individuálního nevyvážení daného tenzometru, takže výsledná měřená hodnota $X_m(\text{adr})$ je dána vztahem:

$$X_m(\text{adr}) = x_n + \Delta X_0(m) + \Delta X_i(\text{adr}) + C \cdot x(\text{adr}). \quad (10)$$

Hodnoty $X_m(\text{adr})$ vysílá sonda přes optický interface do zařízení pro záznam dat.

Šumová složka měřených hodnot x_n není zanedbatelná, neboť s ohledem na napájecí napětí a kapacitu zdroje bylo nutno použít napájecí proud tenzometrů jen 2,4 mA a užitečný signál U_{xm} na vstupu OZ_D je tak jen $1,74 \mu\text{V}/\mu\text{Strain}$. V zapojení podle Obr. 6 se uplatňuje zejména šum OZ_C a OZ_D a šum odporů sepnutých polovodičových multiplexerů. Špičkové hodnoty výsledného šumu v oblasti velmi nízkých frekvencí přesahují $20 \mu\text{V}$ i při použití nejkvalitnějších operačních zesilovačů.

Úroveň šumových složek měřených signálů se při záznamu dat redukuje číslicovou filtrací tak, že se počítají klouzavé průměry N měřených hodnot. Průměrované hodnoty jsou označeny přidaným indexem N (např. $X_m(\text{adr}, N)$). Průměrováním N měřených hodnot klesne šumová složka cca \sqrt{N} krát.

Kompenzační tenzometr TK není deformován, proto hodnota $X_m(13, N) = x_n(N) + \Delta X_0(m)$ reprezentuje systematické nevyvážení můstku, o které lze numericky opravovat měřené hodnoty. Při této operaci se ovšem lineárně neodečítají šumové složky, ale naopak výsledná šumová složka vzroste cca $\sqrt{2}$ krát.

$$X_m(\text{adr}, N) = X_m(\text{adr}, N) - X(13, N) = x_n(N) \cdot \sqrt{2} + \Delta X_i(\text{adr}, N) + C \cdot x(\text{adr}) \quad (11)$$

Ve vztahu (11) $\Delta X_i(\text{adr}, N)$ reprezentuje počáteční hodnoty, které naměříme po instalaci sondy do vrtu těsně před zahájením obvrátávání. Tyto hodnoty lze při interpretaci data dále odečítat (za cenu dalšího zvýšení šumu $\sqrt{2}$ krát) a získat tak výsledné hodnoty deformací $C \cdot x(\text{adr})$.

Citlivost hotové sondy nelze mechanicky kalibrovat. Při výrobě se vybírají co nejshodnější tenzometry z jediné série, lze u nich tudíž předpokládat stejný k-faktor a tudíž stejnou citlivost a teplotní závislost všech měřicích kanálů. Citlivost C proto kalibrujeme známou metodou připojení paralelního rezistoru R_c k měřicím tenzometrům ($R_c \gg R_0$) před zalitím sondy.

Volba rozsahu měření

Jednotlivé kanály můstku v tenzometrické hlavici nelze po vlepení do vrtu individuálně vynulovat. Proto je nutno pracovat v režimu nevyváženého můstku a zvolit dostatečně velký rozsah měření relativních deformací, který umožní vyhodnotit měřené deformace i při značném počátečním nevyvážení tenzometrů. S uvážením předpokládaných maximálních měřených deformací a reálných hodnot výsledného individuálního počátečního nevyvážení tenzometrů po instalaci sondy do vrtu jsme postupně dospěli k výslednému optimálnímu rozsahu měření $\pm 5000 \mu\text{Strain}$. Použití 16-ti bitového AD převodníku je zaručeno ještě dostatečně jemné prokvantování měřených hodnot ($0,3 \mu\text{Strain/LSB}$).

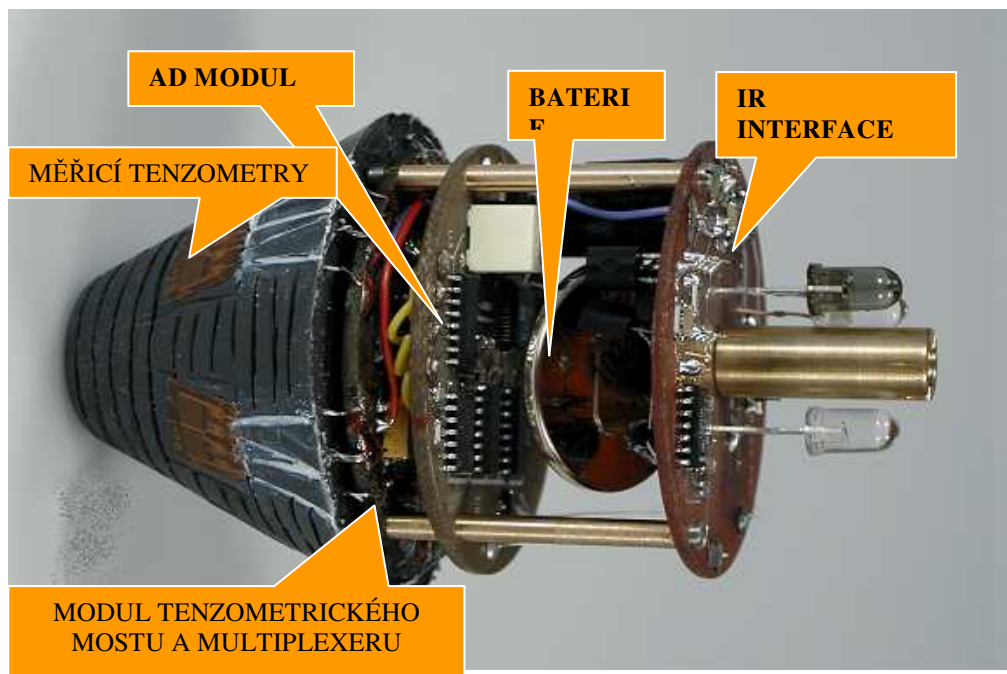
Realizace měřicí aparatury

Aparatura je v současné době ve vývoji. Je vyvinuta tenzometrická hlavice a snímací zařízení. V elektronických obvodech sondy jsou kvůli dosažení nízké spotřeby proudu použity integrované obvody technologie CMOS a nízkopříkonové operační zesilovače rail-to-rail. Jednotlivé části sondy jsou realizovány jako bloky, jejichž správnou funkci lze samostatně ověřit. Optická komunikace je řešena klasickými IR LED a IR fototranzistory. Tělo tenzometrické hlavice je vyrobeno zalitím elektronických obvodů elastickou hmotou do formy a následným vyfrézováním drážek na kuželové ploše. Při instalaci je středový unášec na zadní straně sondy našroubován na zaváděcí soutyčí.

Fotografie prototypu tenzometrické hlavice jsou na Obr.7 a v nezalité podobě na Obr. 8.



Obr.7 Fotografie prototypu tenzometrické hlavice



Obr.8 Fotografie prototypu tenzometrické hlavice v nezalitém stavu

Před zalepením do vrtu se sonda aktivuje zkratováním mikrokonektoru (na Obr. 9 mezi pozicemi 3 a 4). Kapacita napájecího zdroje v sondě je 260mAh. Předpokládáme-li, že měření bude provedeno během dvou směn, kdy během první bude sonda prověřována a instalována do vrtu a ve druhé proběhne vlastní měření a sonda bude trvale zapnuta (pesimistický předpoklad), spotřebuje náboj cca 160 mAh. V režimu „standby“ může tedy být až 4 dny před instalací.

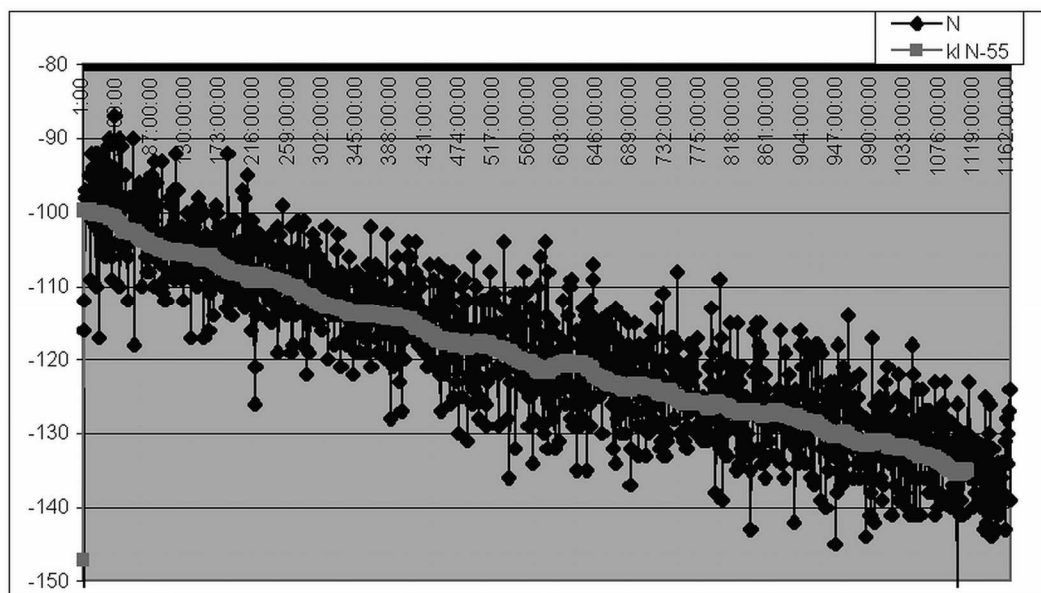
Pro ověření optické komunikace bylo realizováno vodotěsné snímací zařízení (IR_INT) s kabelovým připojením na sériový vstup PC – viz obr. 9. Pro laboratorní zkoušky byl sestaven komunikační program pro počítač třídy PC.



Obr.9 Prototyp tenzometrické hlavice ze strany IR interface a snímací zařízení s kabelovým připojením na sériový vstup PC

Dosažené výsledky

Parametry vyvinuté tenzometrické sondy jsou laboratorně ověřovány. Graf na Obr. 10 znázorňuje naměřená data $X_m(13)$ a klouzavým průměrem $N = 55$ hodnot filtrovaná data $X_m(13, 55)$ z kompenzačního tenzometru, měřená na prvním prototypu sondy s rozsahem $\pm 2500 \mu\text{Strain}$. Z tohoto průběhu je patrné, že amplituda šumu filtrovaného průběhu je cca $\pm 5 \mu\text{Strain}$. Sestupný trend reprezentuje změnu teploty tenzometru a drift vstupní napěťové zesilovače.



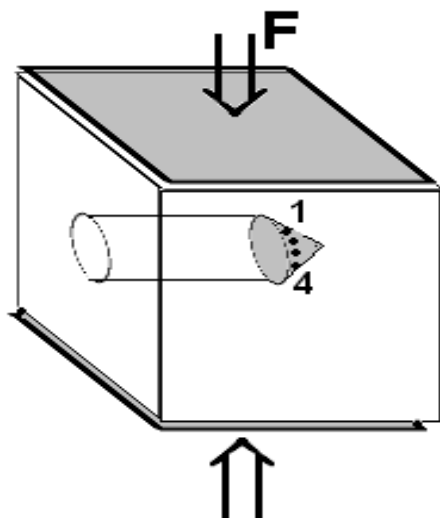
Obr.10 Graf hodnot z kompenzačního tenzometru
(osa x – čas, osa y – poměrná deformace μStrain)

Na základě prvních ověřovacích měření lze předpokládat, že bude možno dosáhnout výsledné přesnosti numericky opravených dat cca $20 \mu\text{Strain}$. Přesnou okamžitou kompenzaci vlivu teplotní závislosti tenzometrů však znemožňuje rozdíl časových konstant měřicích tenzometrů nalepených na povrch kužele a kompenzačního tenzometru uvnitř sondy.

Při zkouškách optické komunikace rychlostí 4800 bps s běžnými IR diodami bylo dosaženo spolehlivé funkce při vzdálenosti cca 0,5 m v čisté vodě. Dále byla ověřována optická komunikace v oblasti viditelného červeného světla s využitím laserových diod doplněných optikou, kde jsme dosáhli větší komunikační vzdálenosti a vyšší spolehlivosti přenosu (až 1m). Pro optickou komunikaci však tvoří nepřekonatelné překážky zakalení výplachové vody a znečištění optických prvků. Intenzita těchto vlivů v reálném vrtu nebyla dosud ověřena.

Ověřovací experimenty

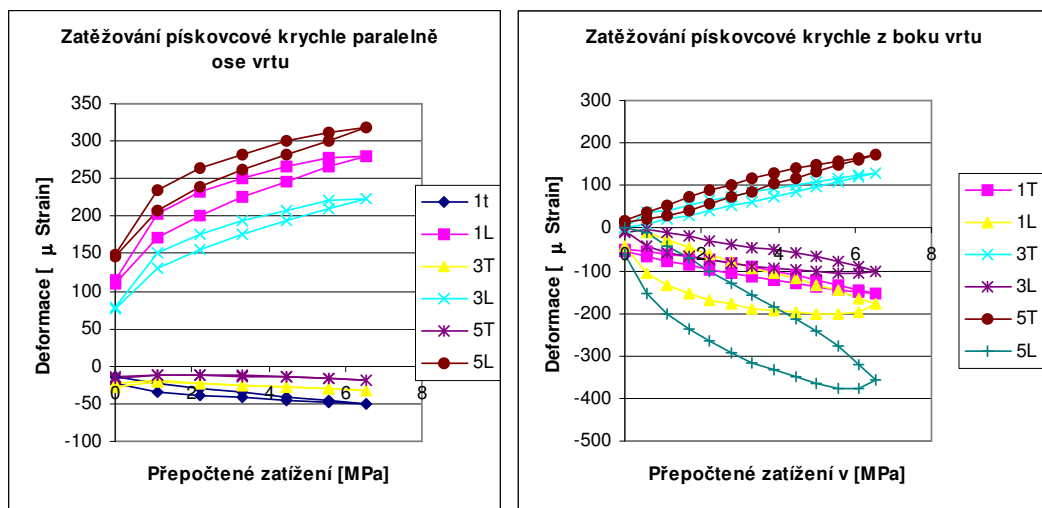
Pro ověření metodiky lepení tenzometrické hlavičky do vrtu byla zhotovena zjednodušená verze kuželové hlavičky sondy, která se připojuje na přenosné měřicí zařízení kabelem. Na Obr. 11 vidíme tuto zjednodušenou hlavičku sondy vplenou do vývrtu v krychli $300 \times 300 \times 300 \text{ mm}$ z godulského pískovce a zatěžovanou pod lisem.



Obr.11 Testování tenzometrické hlavice v krychli godulského pískovce (schéma a foto)

Na dalších obrázcích je vidět odezva vybraných tenzometrů na zatěžování z boku a v ose hlavice (Obr. 12).

Během vývoje tenzometrické hlavice s optickou komunikací byla pro účely ověřování funkčnosti a přesnosti některých součástí aparatury vyvinuta zjednodušená verze měřicí hlavice (Obr. 13), propojená se záznamovým zařízením (DR) kabelem, kterým je také napájena. Tato varianta hlavice je vhodná k dlouhodobému měření změn tenzoru napětí v masivu. Je jasné, že při této aplikaci kromě jiných faktorů hraje klíčovou úlohu otázka kvalitního vlepení a mechanické stability použitého lepidla, zejména v oblasti tzv. „creep“-efektu. Toto je i nadále předmětem našeho studia.

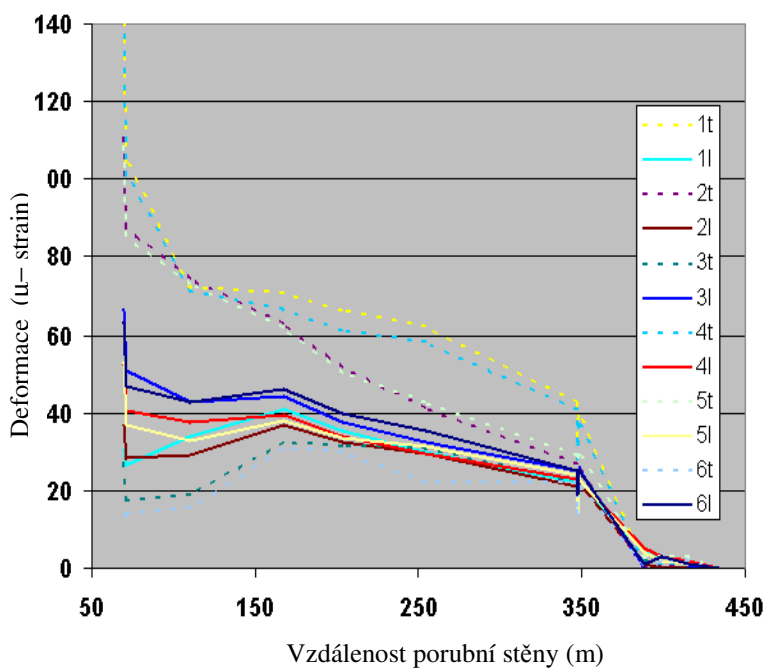


Obr.12 Průběhy testovacího zatěžování krychle 300x300mm s tenzometrickou hlavou pod lisem



Obr.13 Tenzometrická hlavice pro dlouhodobá měření před instalací do vrtu

Funkčnost tenzometrické hlavice pro dlouhodobá měření změn tenzoru napjatosti masivu byla ověřována in-situ v důlním provozu při sledování změn napjatosti spojené s postupující porubní frontou. Ukázka naměřených deformací jednotlivých tenzometrů je uvedena v grafu na Obr. 14.



Obr.14 Ukázka deformací jednotlivých tenzometrů na měřicí hlavici aplikované v předpolí postupující porubní fronty

Závěr

Výsledkem vývoje měřicí aparatury jsou prototypy tenzometrických sond a snímacího zařízení, které umožňují provedení základních zkoušek metodiky měření, tj. způsobu instalace sondy ve vrtu a ověření procesu obvtání, prozatím s nespojitým měřením při zastavené vrtačce. To umožní zjistit základní metodické poznatky, jako např. míru znečištění prvků optické komunikace při vrtání, vliv oteplení masivu při vrtání s výplachem na přesnost naměřených hodnot atd. Dalším výsledkem je ověření možnosti využití zjednodušené variantu kuželové tenzometrické sondy pro účely dlouhodobých sledování změn tenzoru napětí metodou vloženého tělesa.

Práce byly podporovány ukončeným projektem GA ČR 105/01/1242 a v současné době jsou financovány z prostředků úkolu AV0730860518 „Fyzikální a environmentální projevy v litosféře indukované antropogenní činností“ (Výzkumný záměr ÚGN AV ČR).

Literatura

- [176] Kang, S.S. (2000): Measurement and interpretation on stress history of a limestone deposit, *A dissertation for Degree of Doctor of Philosophy* Kumamoto: Kumamoto University
- [177] Nakamura, N., Ohkubo, R., Obara, Y., Kang, S.S., Sugawara, K., Kaneko, K. (1999): Rock stress measurement for limestone open pit mine. In: *Proc. Of 5th Int. Symp. on field Measurements In Geomechanics, Singapore*, pp.375-380. Rotterdam: Balkema
- [178] Staš, L., Souček, K., Hortvík, K., Velička, V., Smetanová, L. (2004): Měření horizontálního napětí v oblasti 4. Kry Dolu ČSA, Z. Doubrava. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – technické univerzity Ostrava. Řada stavební. Str. 295-299.

